

개선 실험 자유경계법을 이용한 차체 구조물의 모드합성

장 경 진* · 박 영 필**

(1999년 3월 4일 접수)

Modal Synthesis of a Car Body Structure Using an Improved Experimental Free-Interface Method

Kyoung-Jin Chang and Young-Pil Park

Key Words: Component Mode Synthesis(구분모드합성), Free-Interface Method(자유경계법), Improved Experimental Free-Interface Method(개선 실험 자유경계법)

Abstract

In the authors' preceeding paper, an improved component mode synthesis (CMS) technique in which experimental data as well as finite-element data are available in sub-systems has been proposed. This technique, called an improved experimental free-interface method (IEFIM), has been proved to be more accurate and more efficient than the conventional experimental CMS method based on McNeal's formulation. It is due to the facts that dynamic residual terms as well as static ones are compensated from experimentally obtained FRFs and that FRFs measured on any frequencies can be used for the compensation. In this paper, the technique is applied to the component mode synthesis of a car body structure. As a result, the applicability of the technique to a large structure is demonstrated.

1. 서 론

구분모드합성법(component mode synthesis, CMS)은 대형구조물의 동적인 특성을 효율적으로 해석하기 위해 개발된 방법으로서, 전체구조물을 여러 개의 부분구조물로 나누어 실험이나 유한요소법으로 해석한 후, 저차로부터 몇 개의 모드를 합성하여 전체의 모드특성을 얻는 방법이다.^(1~5) 이 방법을 이용하면, 구조물의 해석시 방대한 계산용량 및 계산시간을 단축시킬 수 있고, 구조물의 일부를 변경하거나 경계조건을 변화시키는 경우에 전체구조물을 다시 해석하지 않고 변경된 분계(component)만 해석해도 전체 결과를 얻어낼 수 있으며, 특히, 분계별로 실험 및 유한요소데이

터를 각기 사용하여 합성하는 것이 가능하다.^(6,7) 구분모드합성법은 결합영역의 구속여부에 따라 크게 고정경계법(fixed-interface method)^(1,2)과 자유경계법(free-interface method)^(3~5)으로 나누어지는데, 양 방법 모두 합성된 자유도의 축소를 위해 저차의 모드만을 채용하므로 생략된 고차모드의 영향을 별도로 보상해 주어야 하고, 또한 경계를 자유 및 고정상태로 가정하는데 다른 보상도 필요하다. 이 때, 고정경계법에서는 구속모드(constraint modes)를 구해야 하는데, 이를 위해 질량 및 강성과 같은 특성행렬이 필요하므로 실험 데이터를 이용한 모드합성에 많은 어려움이 따르게 된다.^(1,2) 반면에, 자유경계법에서는 McNeal⁽³⁾이 도입한 잉여 부가모드(residual attachment modes)를 실험적으로 구하는 방법이 알려지면서, 유한요소데이터뿐만 아니라 실험에서 구한 주파수응답함수(frequency response function, FRF)를 이용하는 것이 가능하게 되었다. 그러나, McNeal이 도입한 잉여 부가모드는 누락된 고차모드의

* 회원, 현대자동차(주) 남양연구소

** 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : park2814@bubble.yonsei.ac.kr

TEL : (02)361-2814 FAX : (02)364-6769

영향을 1차 근사로 계산한 정적 잉여 부가모드 (static residual attachment modes)이기 때문에 이로 인한 오차가 포함된다. 이에 반해, Craig-Chang⁽⁴⁾이 도입한 잉여 부가모드는 누락된 고차모드의 영향을 2차 근사로 계산한 동적 잉여 부가모드 (dynamic residual attachment modes)이기 때문에 McNeal의 방법보다는 정확하지만, 불행히도 특성행렬로 표현된 식이므로 그 동안 유한요소데이터로만 구할 수 있다는 단점을 안고 있었다. 저자의 지난번 논문⁽⁸⁾에서는 McNeal의 정적 잉여 부가모드보다 더 정확한 Craig-Chang의 동적 잉여 부가모드를 실험데이터로부터 구하는 방법을 개발하고, 이 개선 실험 자유경계법(improved experimental free-interface method, IEFIM)을 판구조물에 적용하여 기존의 방법과 비교함으로써 본 방법의 우수성을 입증한 바 있다. 본 논문에서는 이 방법이 대형구조물에 효과적으로 적용될 수 있음을 검증하기 위하여, 차체 구조물의 모드 합성에 적용하여 보고자 한다.

2. 실험모드합성법의 이론⁽⁸⁾

자유경계법⁽³⁻⁵⁾과 일반화 합성법(generalized synthesis procedure)⁽⁹⁾의 이론, 잉여 부가모드를 계산할 때 유한요소데이터를 이용하는 방법, 잉여 부가모드를 계산할 때 실험데이터를 이용하는 기존의 방법, 잉여 부가모드를 계산할 때 실험데이터를 이용하는 개선된 방법 등은 저자의 논문⁽⁸⁾에 상세히 서술되어 있으며, 본 절에서는 개선 실험 자유경계법의 이론 중에서 Craig-Chang이 도입한 잉여 부가모드를 실험데이터로부터 계산하는 방법을 기존의 실험방법과 비교하여 간단히 소개하고자 한다.

2.1 실험데이터를 이용하는 기존의 방법^(3,6)

자유경계법에 기초하는 모드합성을 수행하려면, 누락된 고차의 모드를 보상하기 위해서 정적 잉여 부가모드나 동적 잉여 부가모드를 구하는 것이 필요하고, 이들은 측정된 저차의 모드로부터 구한 정적 잉여 연성행렬 $[\hat{G}]$ 및 동적 잉여 연성행렬 $[\hat{D}]$ 를 이용하여 표현할 수 있다. 그런데, 모드합성에 실험데이터를 이용하는 기존의 방법은 잉여 부가모드를 1차 근사하여 계산한

McNeal의 방법에 기초를 두고 있다. 즉, 이 방법은 동적 잉여 연성행렬을 사용하지 않고 정적 잉여 연성행렬만을 사용하기 때문에 다소 정확도가 저하되고, 특정 주파수 점에서 측정된 주파수 응답함수만을 이용해야 하는 단점을 안고 있다.

먼저, 실험데이터를 이용하는 기존의 방법을 소개하면 다음과 같다. 측정할 주파수응답함수 (measured FRF)인 $[G_T(\omega)]$ 를 다음과 같이 외력 벡터 $\{f\}$ 및 변위벡터 $\{x\}$ 로부터 표현한다.

$$\{x\} = [G_T(\omega)]\{f\} \quad (1)$$

한편, McNeal의 방법에 의해 정적 잉여 연성행렬로 표현한 변위의 식에 저차의 모드좌표식을 대입하고, 이를 식 (1)과 비교하면, 정적 잉여 연성행렬을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\hat{G}] \cong [G_T(\omega)] - [\Phi_L][\lambda_L - \omega^2 I]^{-1}[\Phi_L]^T \quad (2)$$

식 (2)의 우항은 측정 주파수응답함수에서 저차모드의 성분을 배제한 완전 잉여 연성행렬로서, 원래 주파수에 따라 그 값이 변한다. 이에 반해, 정적 잉여 연성행렬 $[\hat{G}]$ 는 주파수 변동성분을 무시하고, 0 Hz의 주파수에서 근사 계산한 값이다. 따라서, 식 (2)의 우변의 주파수에 0 Hz를 대입하면, 다음과 같이 정적 잉여 연성행렬을 계산할 수 있다.

$$[\hat{G}] = [G_T(0)] - [\Phi_L][\lambda_L]^{-1}[\Phi_L]^T \quad (3)$$

그러나, 실제적으로 0 Hz에서의 주파수응답함수 $G_T(0)$ 를 측정하기란 센서의 신뢰도 문제로 인해 매우 어려운 일이다. 하지만, 식 (2)의 우항, 즉 완전 잉여 연성행렬은 0 Hz근처에서 그 값이 극히 서서히 변한다는 사실을 이용하여, 0 Hz에서 측정된 주파수응답함수대신 0 Hz근처 주파수 점인 ω_a ($\omega_a \cong 0$)에서 측정된 주파수응답함수를 대신 이용함으로써 다음과 같이 정적 잉여 연성행렬을 근사적으로 구할 수 있다.

$$[\hat{G}] \cong [G_T(\omega_a)] - [\Phi_L][\lambda_L - \omega_a^2 I]^{-1} [\Phi_L]^T \quad (4)$$

이와 같은 기존의 방법은 McNeal의 1차 근사에 바탕을 두고 있기 때문에 Craig-Chang의 2차 근사 방법에 비해 보다 큰 오차를 포함하고 있고, 아울러 정적 잉여 연성행렬을 0 Hz가 아닌 그 근처의 주파수 점에서 근사 계산하므로 비록 크지는 않지만, 이에 따른 오차를 배제할 수 없으며, 또한, 0 Hz를 크게 벗어나선 안 된다는 제약으로 인해 모드실험에 어려움을 겪을 소지가 있다.

2.2 실험데이터를 이용하는 개선된 방법⁽⁸⁾

본 절에서는 저자의 지난 논문⁽⁸⁾에서 제안한 개선 실험 자유경계법의 이론을 간략히 소개하고자 한다. 본 방법은 실험데이터를 이용할 수 있는 모드합성방법으로서, Craig-Chang의 2차 근사 방법에 기초하므로 McNeal의 1차 근사방법보다 정확도가 높은 방법이다. 먼저, 변위벡터를 저차와 고차의 모드로 분할하여 표현하고, 고차의 모드좌표에 고차모드만으로 표현된 식을 대입하면, 완전 잉여 연성행렬(full residual flexibility matrix) $[R(\omega)]$ 을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\{x\} = [\Phi_L]\{q_L\} + [R(\omega)]\{f\} \quad (5)$$

여기서,

$$[R(\omega)] = [\Phi_H][\lambda_H - \omega^2 I]^{-1} [\Phi_H]^T \quad (6)$$

또한, 저차의 채용모드로 표현한 저차의 모드좌표식을 식 (5)에 대입하고, 이를 식 (1)과 비교하면, 측정할 주파수응답함수(measured FRF)인 $[G_T(\omega)]$ 를 다음과 같이 저차의 채용모드와 완전 잉여 연성행렬로부터 표현할 수 있다.

$$[G_T(\omega)] = [\Phi_L][\lambda_L - \omega^2 I]^{-1} [\Phi_L]^T + [R(\omega)] \quad (7)$$

또한, 다음과 같이 재생주파수응답함수(regenerated FRF) $[G_R(\omega)]$ 를 정의하고,

$$[G_R(\omega)] = [\Phi_L][\lambda_L - \omega^2 I]^{-1} [\Phi_L]^T \quad (8)$$

식 (8)을 식 (7)에 대입하여, 완전 잉여 연성행렬을 다음과 같이 다시 표현한다.

$$[R(\omega)] = [G_T(\omega)] - [G_R(\omega)] \quad (9)$$

식 (9)에 임의의 두 개의 주파수 점을 대입함으로써, 이들 두 주파수 점에서 측정한 주파수응답함수들과 재생주파수응답함수들로부터 완전 잉여 연성행렬을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[R(\omega_1)] = [G_T(\omega_1)] - [G_R(\omega_1)] \quad (10)$$

$$[R(\omega_2)] = [G_T(\omega_2)] - [G_R(\omega_2)] \quad (11)$$

한편, Craig-Chang의 2차 근사방법에 기초하는 변위의 표현식과 식 (5)를 비교함으로써 완전 잉여 연성행렬을 다음과 같이 정적 잉여 연성행렬과 동적 잉여 연성행렬로부터 근사적으로 표현할 수 있다.⁽⁸⁾

$$[R(\omega)] \cong [\hat{G}] + \omega^2 [\hat{D}] \quad (12)$$

식 (10)과 식 (11)을 식 (12)와 연립함으로써, 정적 잉여 연성행렬 및 동적 잉여 연성행렬을 다음과 같이 두 개의 주파수 점에서 계산한 완전 잉여 연성행렬로 표현할 수 있다.

$$[\hat{D}] = \frac{[R(\omega_2)] - [R(\omega_1)]}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \quad (13)$$

$$[\hat{G}] = [R(\omega_1)] - \omega_1^2 [\hat{D}] \quad (14)$$

따라서, 위의 식으로부터 정적 잉여 연성행렬 및 동적 잉여 연성행렬 모두를, 임의의 두 개의 주파수 점에서 측정한 주파수응답함수들과 저차의 측정모드들로부터 계산할 수 있다. 본 방법

은 2차 근사를 적용하므로, McNeal의 1차 근사 방법을 토대로 한 기존의 실험모드합성법보다 정확하고, 아울러 McNeal의 방법처럼 반드시 0 Hz 근처의 주파수 점에서 주파수응답함수를 측정할 필요가 없으며, 이로 인한 오차가 들어가지 않는다는 장점을 갖고 있다. 다만, 고차모드 계산을 위한 측정 주파수 점의 선정 시 여전히 다음의 두 가지 이유에 의한 오차가 포함될 수 있으므로, 이에 따른 주의가 필요하다. 첫 번째는 식 (8)의 $[G_R(\omega)]$ 이 모드해석 후 재계산한 값이므로, 모드 추출과정의 오차가 삽입될 수도 있고, 두 번째는 식 (13)의 계산 시 ω_1 과 ω_2 가 너무 근접할 경우, 악조건(ill-conditioned)이 되어, $[\hat{G}]$ 와 $[\hat{D}]$ 의 계산결과가 부정확해질 수 있다. 이 중 첫 번째 문제는 특히 실험데이터를 이용할 때 큰 오차를 낳을 수도 있는 문제로서, 모드 추출과정의 정확도를 높이기 위해서는, 여러 번의 모드해석을 통해 원시 주파수응답함수(raw FRF)와 모드해석한 후 재생된 주파수응답함수의 오차를 검토하여, 그 값이 최소가 되도록 하는 것이 필요하다. 아울러, 측정 주파수 점의 선택은 공진봉(resonance peak) 및 반공진봉(anti-resonance peak)은 피하되, 가급적 신호대잡음비(S/N)가 상대적으로 높고, 곡선적합의 오차가 적은 공진봉 부근점을 사용하는 것이 좋다.⁽¹⁰⁾

3. 차체 구조물의 실험모드합성

본 장에서는 개선 실험 자유경계법을 대형구조물에 적용할 때의 효율성 및 정확성을 검증하기 위해, 본 방법을 이용하여 BIW(body-in-white)에 센터멤버(center member)를 연결한 차체구조물의 모드합성을 수행하고, 이를 전계 구조물의 해석결과와 비교하였다.

3.1 전계의 모델

모드합성과정에 앞서 전계 구조물의 실험 및 유한요소해석을 수행하였다. 먼저, 센터멤버가 부착된 BIW를 대상으로 임팩트해머(impact hammer)로 가진하고 단축 가속도계(accelerometer) 3개로 응답을 측정하는 모드실험을 수행하였다. 이때 가진점은 BIW의 183점과 센터멤버 3점을 합한 186점으로 선정한 상태에서 각 지점마다 3축 방향 중 가장 적절한 방향을 택하여 가진을 하였고, 응답점은 BIW의 우측 뒷좌석근처의 한 지점으로 선정한 후 세 방향 모두의 응답을 받아 총 558개의 주파수응답함수를 갖고 모드해석을 수행하였다. 이때, 실험해석소프트웨어로서는 LMS사의 CADA-X를 이용하였다. 한편, BIW 및 센터멤버의 설계자료를 토대로 ANSYS 소프트웨어를 사용하여 유한요소모델링을 수행하였다.

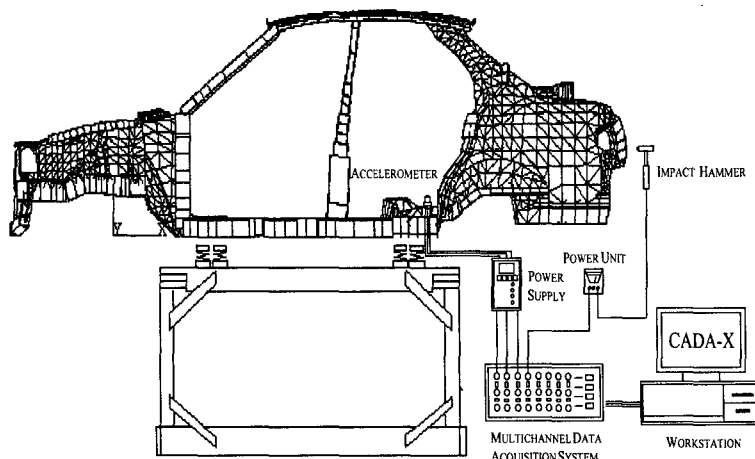


Fig. 1 Schematic view of the experimental set-up

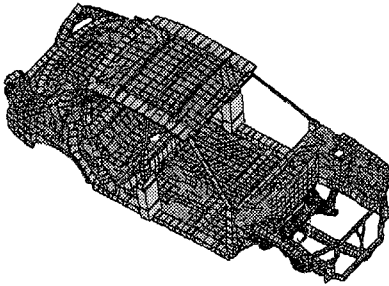


Fig. 2 FE model of a whole structure

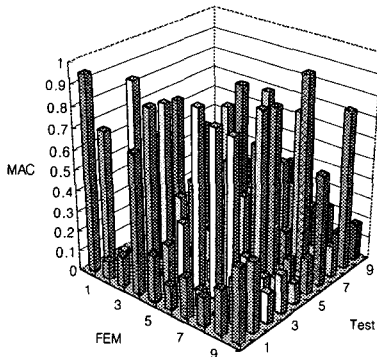


Fig. 3 MAC comparison between the FE and test model of a whole structure

BIW는 연강을 소재로 하고 있고 차체에서 감쇠효과가 큰 내장재나 기계장치들이 제외된 구조물이기 때문에, 본 논문에서는 비감쇠로 모델링하였다. Fig. 1에는 모드실험장치를 도시하였고, Fig. 2에는 전체 구조물에 대한 유한요소모델의 형상을 도시하였으며, Table 1에는 실험모드해석 및 유한요소해석으로부터 나온 탄성모드의 고유진동수를, Fig. 3에는 실험과 유한요소모드벡터간의 MAC(mode assurance criterion) 비교 결과를 도시하였다. 고유진동수 및 모드형상 비교에 있어서, 실험과 유한요소해석의 결과에 다소 차이가 있는 것으로 나타났는데, 이것은 실험 오차 및 다음과 같은 모델링 오차들, 즉, 필라(pillar)부를 쉘요소(shell element)가 아닌 등가 단면의 보요소(beam element)로 모델링한데 따른 오차, 필라부의 연결지점에서의 강성 추정 오차, 수많은 점용접(spot welding)점을 근사하여 모델링한 데 따른 오차등에 기인하는 것으로 판단된다.

3.2 분계의 선정

BIW에 크로스멤버(cross member)를 부착한 구조물을 분계 1로 선정하고, Fig. 4에서 보이는 센터멤버를 분계 2로 선정한 후, 모드합성을 수행하고자 하였다. 센터멤버와 크로스멤버는 차체에 엔진을 장착하기 위한 지지대 역할을 하는 구조물들이다.

Table 1 Natural frequencies of the FE and test model of a whole structure

Elastic mode	FEM		Test	
	Freq. (Hz)	Modeshape	Freq. (Hz)	Modeshape
1	26.98	1st torsion	27.11	1st torsion
2	41.28	1st bending	29.86	1st torsion+local
3	47.69	2nd bending	41.11	1st bending
4	48.86	2nd torsion	47.99	2nd bending
5	59.70	front body bending	52.05	rear end bending
6	62.28	rear floor bending	54.56	rear floor bending
7	64.88	roof+cowl bending	58.67	front body torsion
8	68.22	tulip area bending	65.38	cowl+tulip area bending
9	71.14	front body torsion	69.23	floor bending+torsion
10	74.83	floor bending+torsion	73.50	compartment bending

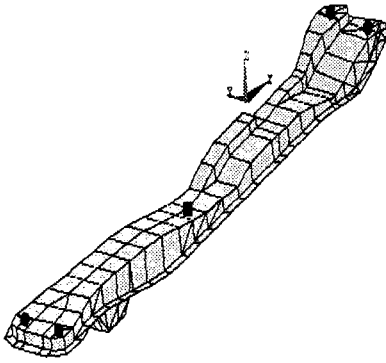


Fig. 4 FE model of a center member

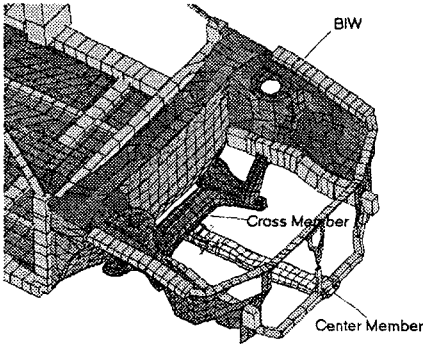


Fig. 5 Overview of combined substructures

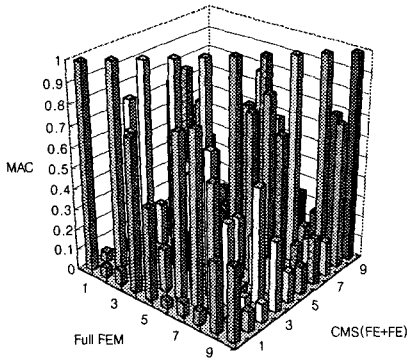


Fig. 6 MAC comparison between the full FE and the CMS results (when using FE database)

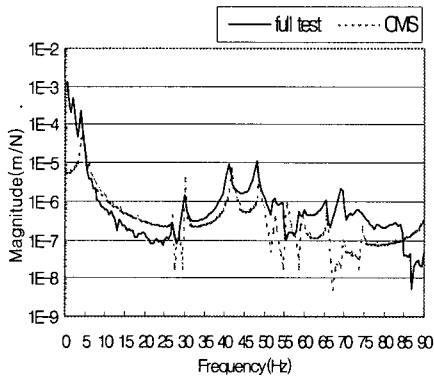
Table 2 Specification of the FE model of both components

FE model	Comp. #1		Comp. #2
	BIW	Cross-member	Center-member
Shell elements	4838	908	416
Beam elements	550	0	0
Nodes	3221	645	341

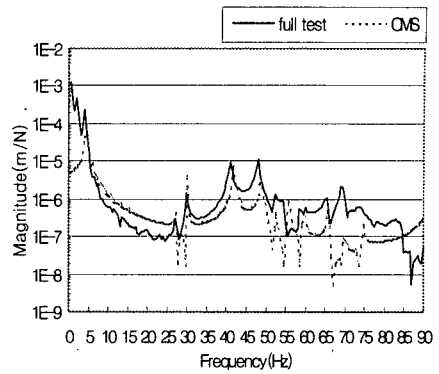
이들 센터멤버와 BIW는 Fig. 5와 같이 각기 크로스멤버를 거쳐서 연결된다. 이때, 분계 1의 크로스멤버와 분계 2인 센터멤버는 네 지점에서 고무 부시(bush)와 볼트로 연결되므로, 모드합성에 양 분계는 이들 지점의 상하 병진 자유도에서만 연결되는 것으로 모델링 하였다. 이와 비교하기 위한 전계의 유한요소모델 역시, 각 결합영역에서 상하 병진 자유도를 제외한 나머지 다섯 자유도의 강성은 무시하고 모델링 하였다. 본 연구에서는 데이터 종류를 달리하여 두 가지 경우의 모드합성을 수행하였는데, 첫 번째 경우는 분계 1과 분계 2에 모두 유한요소데이터를 사용한 경우이고, 두 번째 경우는 분계 1에는 실험데이터를, 그리고 분계 2에는 유한요소데이터를 사용한 경우이다. 모드합성에 사용한 각 분계 유한요소모델의 제원을 Table 2에 나타내었다.

3.3 유한요소데이터를 이용한 모드합성

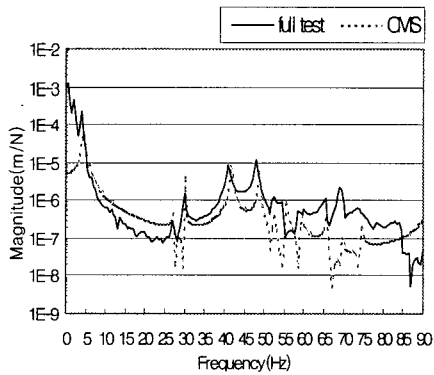
먼저, 양 분계에 모두 유한요소데이터를 사용한 경우에 대하여, Craig-Chang의 2차 근사방법을 이용하여 모드합성을 수행하였다. 이때, 양 분계에서 채용한 모드개수는 강제모드를 포함하여 각기 30개씩이다. Table 3에는 모드합성결과와 전계 유한요소해석결과의 고유진동수를 비교하였고, Fig. 6에는 모드합성결과와 전계 유한요소해석결과의 MAC값을 비교하였다. Table 3에서, DOFs(degrees-of-freedom)는 최종적인 고유치 해석을 수행하는 과정에 사용된, 전계 및 합성된 계의 자유도 개수를 나타낸다. 결과를 보면, 본 연구에서 관심이 있는 저주파수 대역에서, 모드합성결과가 전계의 유한요소해석결과와 아주 잘 맞는 것을 볼 수 있다.



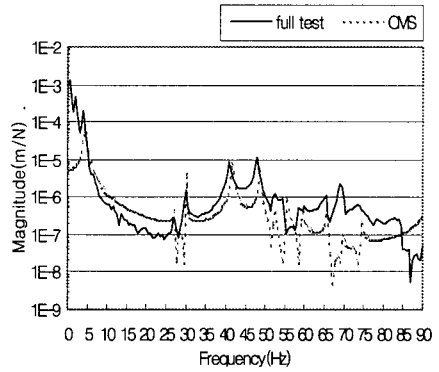
(a) 1Hz, 2Hz



(c) 1Hz, 60Hz



(b) 1Hz, 20Hz



(d) 10Hz, 60Hz

Fig. 7 FRFs comparison between the full test and CMS results (w.r.t the frequency points of FRFs adopted for CMS)

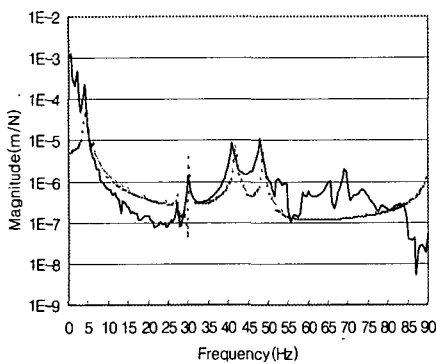
3.4 유한요소분계 및 실험분계의 모드합성

이미 언급한 바와 같이, 모드합성에 실험데이터를 사용할 경우에는, 누락된 고차모드를 보상하는 데 어려움이 따르고 근사에 의한 오차로 인해 정확도도 저하되게 마련이다. 더구나 분계별로 유한요소데이터 및 실험데이터를 연계하여 사용할 경우에는 해석 및 측정자유도의 불일치문제를 해결해야 한다는 문제가 추가된다. 본 연구에서는 이러한 경우에도 본 방법이 대형구조물에 잘 적용될 수 있는지를 보고자, 앞 절의 차체구조물을 대상으로 분계 1에는 실험데이터를 사용하고, 분계 2에는 유한요소데이터를 사용하여, 저자의 지난 논문에서 제안한 개선 실험 자유경계

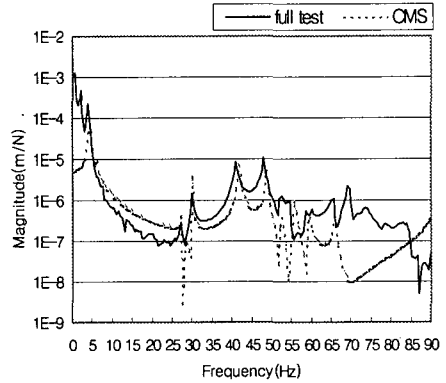
법(improved experimental free-interface method, IEFIM)으로 모드합성을 수행하였다. 모드합성시 결합영역은 상하 병진 자유도만 갖는 4개 지점으로 모델링 하였고, 분계 1의 내부영역은 역시 상하병진 자유도만 갖는 14개 지점을 임의로 선택하였다. 한편, 누락된 잉여모드의 영향을 특성행렬로부터 계산하는 앞 절의 모드합성 방법⁽⁴⁾과는 달리, 본 절의 실험모드합성 방법에서는 이를 결합영역의 주파수응답함수로부터 계산하기 때문에, 분계 1의 실험데이터로서 고유진동수 및 모드벡터 외에 결합영역의 모든 자유도에 대한 주파수응답함수가 추가로 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 먼저 모드해석을 거치지 않은 원시 주

파수응답함수(raw FRF)를 결합영역의 두 개 주파수 점에서 측정하여, 식 (10)과 식 (11)의 $[G_T(\omega_1)]$, $[G_T(\omega_2)]$ 로 이용하고, 모드해석후 식 (8)로부터 저차모드만을 채용하여 두 개 주파수 점에서 계산한 주파수응답함수를 $[G_R(\omega_1)]$, $[G_R(\omega_2)]$ 로 각기 이용하여, 식 (13) 및 식 (14)로부터 정적 및 동적 잉여 연성행렬을 계산하였다. 한편, 기존의 실험모드합성법은 주파수응답함수의 어느 주파수 점을 사용하느냐에 따라 결과가 크게 바뀌는 반면, 본 방법은 이러한 변동이 거의 없다는 장점을 갖고 있다. 따라서, 이러한 특징을 보이기 위해, Table 4에서는 잉여모드의 2차 근사를 위해 채용한 두 개의 주파수 점을 다양하게 변화시켜 가며 모드합성을 수행한 후

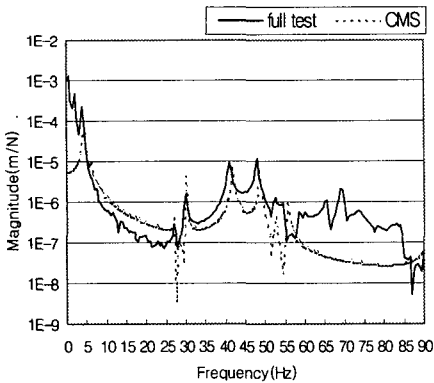
그 고유진동수를 전체의 실험결과와 함께 비교하였고, Fig. 7에서는 이렇게 주파수 점을 달리하며 모드합성을 수행하여 얻은 전체의 고유진동수 및 고유벡터로부터 리셉턴스(receptance)를 계산하여 전체 실험의 리셉턴스와 함께 비교하였다. 이때, 가진점은 분계 1의 가속도계 부착점으로 택하였고, 응답점은 분계 2인 센터멤버의 중앙 지점으로 택하였다. 결과를 보면, 모드합성결과가 전체의 실험결과와 거의 유사한 것을 알 수 있고, 또한 주파수 점 선택에 따른 변동이 거의 없다는 사실을 확인할 수 있다. Table 5에서는 분계 1에서 채용한 모드개수를 6개, 8개, 10개, 12개로 변화시켜 가며 모드합성을 수행한 후 고유진동수를 비교하였고, Fig. 8에서는 이들 경우에 대하여 모드합성결과로부터 계산한 리셉턴스를 전체 실험



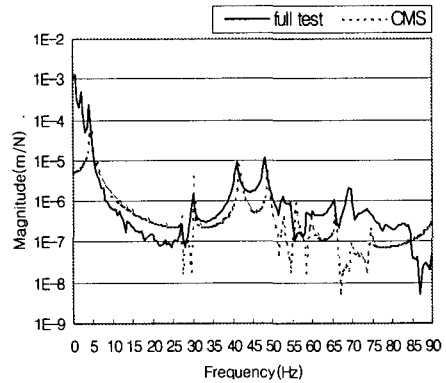
(a) 6 modes



(c) 10 modes



(b) 8 modes



(d) 12 modes

Fig. 8 FRFs comparison between the full test and CMS results (w.r.t the number of modes adopted for CMS)

의 리셉턴스와 비교하였다. Fig. 9에서는 모드합성 결과로부터 계산한 리셉턴스의 가진점을 달리 한 결과를 비교하였다. Fig. 9에서 FRF #1~#4는 각기 BIW의 우측 전방으로부터 일정간격을 두고 임의로 선택한 4개의 점을 가진점으로 사용하고, 센터멤버의 중앙점을 응답점으로 사용한 경우의 리셉턴스이다. 한편, Fig. 10에서는 모드합성과 전계 실험모드벡터간의 MAC을, Fig. 11에서는 모드합성과 전계 유한요소모드벡터간의 MAC을 비교하였다. 먼저, 채용모드 개수를 변화시켜 가며 비교한 Table 5의 고유진동수 결과는, 일반적인 모드합성 결과에서 예측할 수 있는 바와 같다. 즉, 분계 1에서 채용한 모드가 속해 있는 주파수 대역이내(예를 들어, 6개 모드를 채용한 경우는 이들 모드가 속해 있는 50Hz이내, 8개 모드를 채용한 경우는 56Hz이내, 10개 모드를 채용한 경우는

68Hz이내 등)에서 모드합성결과가 전계의 실험결과와 잘 들어맞는 것을 알 수 있다. 아울러, Fig. 8~11의 리셉턴스 및 MAC 비교 결과 역시 잘 들어맞는 것을 알 수 있다. 한편, 계산의 효율성 면에서 비교하면, 본 방법은 동적 잉여 부가모드의 계산이 추가되므로, McNeal의 1차 근사 방법보다는 계산량이 다소 많지만, 전체 계를 실험하거나 해석하는 경우보다는 훨씬 효율적이다. 따라서, 차체와 같이 대형구조물이면서, 분계별로 실험 및 해석을 병행하는 것이 필요하고, 주요 관심대상이 저차모드에 국한되어 있으면서, 감쇠가 작고, 채용모드가 충분히 분리되어 있어 실험 모드 추출과정의 오차가 작은 것으로 판단되는 경우에, 본 방법은 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

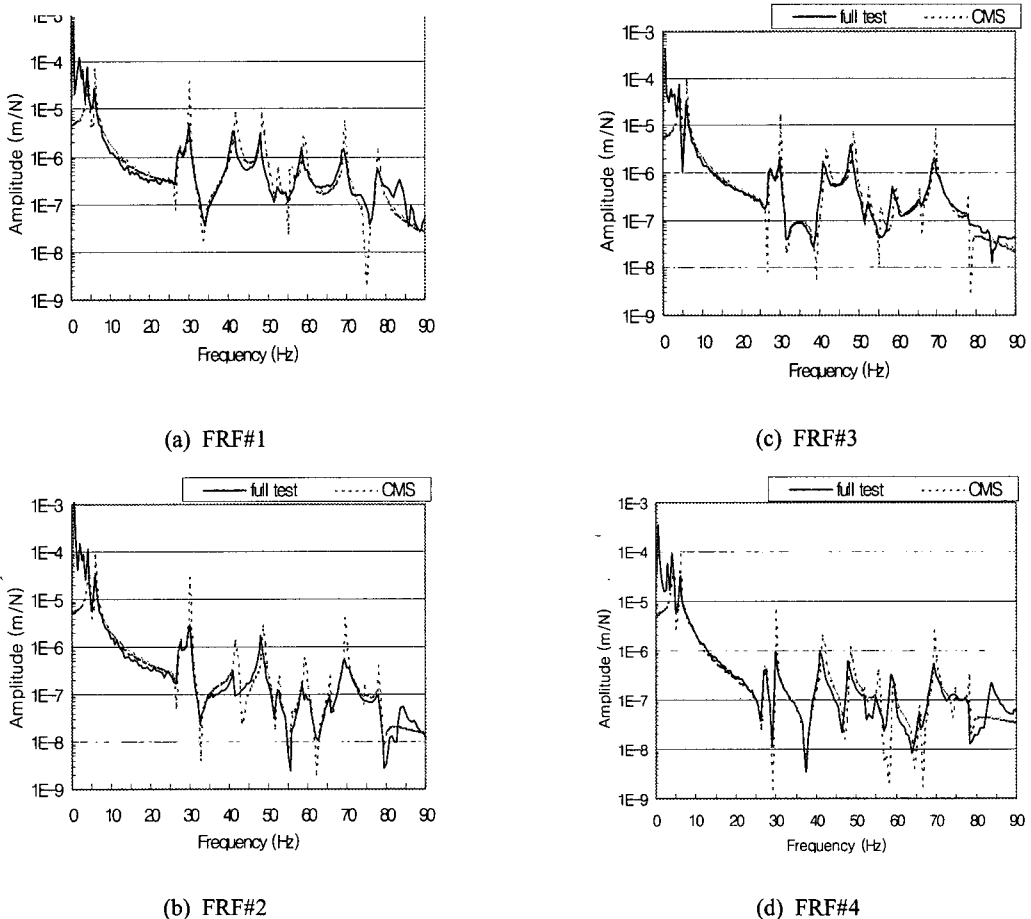


Fig. 9 FRFs comparison between the full test and CMS results (w.r.t the measuring points used in CMS)

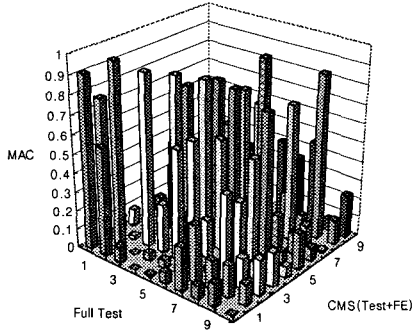


Fig. 10 MAC comparison between the full test and CMS results of a BIW

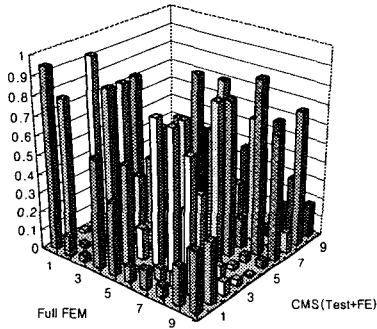


Fig. 11 MAC comparison between the full FE and CMS results of a BIW

Table 3 Natural frequencies calculated in CMS when using FE database (Hz)

Mode	Full FEM	CMS (FE+FE)
1	26.98	26.98
2	41.28	41.29
3	47.69	47.70
4	48.86	48.86
5	59.70	59.70
6	62.28	62.29
7	64.88	64.95
8	68.22	68.23
9	71.14	71.15
10	74.83	74.84
DOFs	25230	60

Table 4 Natural frequency comparison w.r.t the frequency points of FRFs adopted for CMS (Hz)

Mode	Full test	CMS (test+FE)			
		1Hz, 2Hz	1Hz, 20Hz	1Hz, 60Hz	10Hz, 60Hz
1	27.11	27.19	27.19	27.19	27.19
2	29.86	29.98	29.98	29.98	29.98
3	41.11	41.69	41.69	41.69	41.69
4	47.99	48.65	48.65	48.65	48.65
5	52.05	52.25	52.25	52.25	52.25
6	54.56	55.66	55.66	55.66	55.66
7	58.67	59.22	59.22	59.22	59.22
8	65.38	65.69	65.69	65.69	65.69
9	69.23	69.59	69.59	69.59	69.59
10	73.50	74.28	74.28	74.28	74.28

Table 5 Natural frequency comparison w.r.t the number of modes adopted for CMS (Hz)

Mode	Full test	CMS (test+FE)			
		6	8	10	12
1	27.11	27.19	27.19	27.19	27.19
2	29.86	29.98	29.98	29.98	29.98
3	41.11	41.69	41.69	41.69	41.69
4	47.99	48.65	48.65	48.65	48.65
5	52.05	90.55	52.25	52.25	52.25
6	54.56	132.99	55.66	55.66	55.66
7	58.67	207.94	91.89	59.22	59.22
8	65.38	308.95	207.59	65.69	65.69
9	69.23	399.30	279.41	92.02	69.59
10	73.50	459.78	368.47	208.09	74.28

4. 결 론

본 논문에서는 대형구조물의 실험모드합성을 효율적으로 수행하기 위해 개발한, 개선 실험 자유경계법을 차체 구조물에 적용함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 각 분계 모두 유한요소데이터를 사용하여 Craig-Chang의 2차 근사방법으로 모드합성을 수행할 경우, 비록 저차 주파수대역의 모드만을 채용하더라도 전계의 해석결과와 거의 유사한 결과를 나타냈는데, 이는 2차 근사방법에 기초하는 Craig-Chang의 수식이 우수함을 입증한다.

(2) 개선 실험 자유경계법은, 누락된 고차모드의 보상을 위한 잉여 부가모드의 계산 시 여전히 모드 추출과정의 오차가 존재하긴 하지만, 본 방법은 동적 잉여 부가모드를 이용하는 Craig-Chang의 2차 근사방법에 기초하므로, McNeal의 1차 근사방법에 기초하는 기존의 실험모드합성법보다 정확도가 높은 방법이다.

(3) McNeal의 1차 근사방법에 기초하는 기존의 실험모드합성법은, 잉여 부가모드계산을 위해 필요한 주파수응답함수의 측정 주파수 점 선택에 제한을 갖고, 아울러 강체모드가 존재하는 자유상태의 구조물에는 적용할 수 없다는 단점을 갖고 있는 반면, 본 연구에서 사용한 개선 실험 자유경계법은, 구조물의 구속조건에 영향을 받지 않으며, 측정 주파수 점 선택 시에 공진봉, 반공진봉을 피하는 것이 필요하나, 기존 방법보다 주파수 선택의 제약이 크지 않다는 장점을 갖는다.

(4) 개선 실험 자유경계법은 분계별로 실험데이터나 유한요소데이터를 따로 혹은 병용하여 사용할 수 있고, 고유치 해석에 필요한 계산량이 있어 전계를 해석하는 경우보다 작으므로, 대형구조물의 모드합성을 효율적으로 수행할 수 있는 방법이다.

참고문헌

(1) Craig, R. R., Jr. and Bampton, M. C. C., 1968, "Coupling of Substructures for Dynamic Analysis," *AIAA Journal*, Vol. 6, No. 7, pp. 1313~1319.

(2) Hintz, R. M., 1975, "Analytical Methods in Component Modal Synthesis," *AIAA Journal*, Vol. 13, No. 8, pp. 1007~1016.

(3) MacNeal, R. H., 1971, "A Hybrid Method of Component Mode Synthesis," *Computers and Structures Journal*, Vol. 1, pp. 581~601.

(4) Craig, R. R., Jr. and Chang, C. J., 1977, "On the Use of Attachment Modes in Substructure Coupling for Dynamic Analysis," *AIAA Proceedings of the 18th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, pp. 89~99.

(5) Urgueira, A. P. V. and Ewins, D. J., 1989, "A Refined Modal Coupling Techniques for Including Residual Effects of Out-of-Range Modes," *Proceedings of the 7th International Modal Analysis Conference*, pp. 299~306.

(6) Baker, M., 1986, "Component Mode Synthesis Methods for Test-Based, Rigidly Connected Flexible Components," *AIAA Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 23, No. 3, pp. 316~322.

(7) Hermanski, M., Ostholt, H. and Bielefeld, F., 1987, "Linking Finite Elements with Experimental Modal Analysis," *International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, pp. 144~147.

(8) 장경진, 박영필, 1998, "동적 잉여항의 보상에 의한 실험모드합성법의 개선," *대한기계학회논문집(A)*, 제22권, 제7호, pp. 1267~1277.

(9) Smith, M. J. and Hutton, S. G., 1992, "A General Substructure Synthesis Method for a Free-Interface Component Mode Representation," *Proceedings of the 10th International Modal Analysis Conference*, pp. 900~906.

(10) Lammens, S., Brughmans, M., Leuridan, J. and Sas, P., 1995, "Application of a FRF based Model Updating Technique for the Validation of Finite Element Models of Components of the Automotive Industry," *Society of Automotive Engineer Trans.*, Paper No. 951246, pp. 103~115.